

OFDM 레이다 시스템에서 부반송파 사용 비율에 따른 YOLOv8 기반 다중 객체 개수 추정

고은아, 전소연, 정의림*

국립한밭대학교

dms1163@naver.com, jeonssol1109@gmail.com, *erjeong@hanbat.ac.kr

YOLOv8-Based Multi-Object Counting under Different Subcarrier Utilization Ratios in OFDM Radar Systems

Ko Eun A, Jeon So Yeon, Jeong Eui Rim*

Hanbat National University

요약

본 논문은 통신-센싱 융합(ISAC, Integrated Sensing and Communication)의 핵심 기술로 주목받고 있는 OFDM 레이다 시스템을 대상으로, YOLOv8 객체 검출 모델을 활용하여 부반송파(subcarrier) 사용 비율이 다중 객체 개수 추정 성능에 미치는 영향을 분석한다. 제한된 주파수 자원과 연산 효율성을 고려하여 전체 대역폭 내 부반송파 중 일부를 등간격으로 선택하는 할당 기법을 적용하였으며, 해당 기법에 따른 다중 객체 개수 추정 성능을 평가하였다. 시뮬레이션 결과, 부반송파 사용 비율(100%, 50%, 25%)을 감소시킬 경우, 본 실험 조건에서는 다중 객체 개수 추정 성능에 큰 성능 저하가 관측되지 않았으나, 부반송파 간격 증가에 따라 거리 측 해석 범위 및 거리 해상도 측면에서 물리적 제약이 발생함을 확인하였다. 반면, OFDM 심볼 수의 증가는 다중 객체 개수 추정 성능을 향상시키는 주요 요인으로 작용하였으며, 특히 낮은 SNR 환경에서 그 효과가 더욱 뚜렷하게 나타났다. 이러한 결과는 향후 통신-센싱 융합 시스템 설계에서 OFDM 심볼 수 최적화의 중요성을 시사한다. 본 연구는 자율주행, 스마트 시티, 보안 감시 등 다양한 응용에 활용 가능하며, 차세대 통신-센싱 융합 기술 발전에 기여할 수 있다.

I. 서론

현대 무선 통신 기술은 5G를 넘어 6G 시대로 진입함에 따라, 단순한 데이터 전송 성능 향상을 넘어 물리적 환경을 인지하는 센싱 기능의 통합을 핵심 방향으로 급속히 변화하고 있다. 또한, 자율주행 차량, 무인 항공기(UAV), 스마트 시티 등 4차 산업혁명의 주요 응용 분야에서는 주변 환경을 정밀하게 인지하기 위한 고성능 센싱 기술의 중요성이 지속적으로 증대되고 있다. 이러한 흐름 속에서 차세대 이동통신(6G)에서는 통신과 레이다 기능을 동일한 하드웨어 및 주파수 자원에서 통합적으로 수행하는 통신-센싱 융합(ISAC, Integrated Sensing and Communication) 기술이 핵심 솔루션으로 주목받고 있다[1]. ISAC은 제한된 주파수 스펙트럼 자원과 하드웨어 비용을 효율적으로 활용할 수 있다는 점에서 높은 기술적 가치를 지닌다. 특히 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 레이다 시스템은 높은 스펙트럼 효율성과 다중 경로 페이딩에 대한 강인성을 갖추고 있으며, 기존 통신 인프라와의 우수한 호환성을 바탕으로 별도의 센싱 전용 주파수 할당 없이도 기존 통신 신호 구조를 활용하여 통신과 레이다 기능을 동시에 수행할 수 있는 장점을 가진다.

한편, 최근에는 딥러닝(Deep Learning) 기술이 레이다 신호 처리 분야에 적극적으로 도입되고 있다. 딥러닝 모델은 데이터에 내재된 복잡한 비선형 관계를 효과적으로 학습할 수 있어, 수학적 모델링이 어려운 간접 환경이나 유의미한 특징(feature)을 추출하는 데 우수한 성능을 보인다. 특히 YOLOv8은 앵커 프리(anchor-free) 구조와 다중 스케일 예측 메커니즘을 통해 다양한 크기의 객체를 효과적으로 검출할 수 있으며, 연산 효율성과 정확도 간의 균형 측면에서도 우수한 성능을 제공하는 것으로 알려져 있

다. 이러한 특성으로 인해 YOLOv8은 레이다 기반 객체 검출 및 다중 객체 분석 문제에 적용 가능성이 높은 모델로 평가된다. 기존 연구에서는 모든 부반송파를 사용하는 OFDM 레이다 환경에서 YOLOv5 및 YOLOv8 기반 다중 객체 추정 성능을 비교·분석한 바 있다[2]. 그러나 주파수 자원 및 연산 복잡도 제약으로 인해 일부 부반송파만을 활용하는 경우가 일반적이다. 본 연구는 이러한 현실적 제약을 반영하여, OFDM 레이다 환경에서 YOLOv8을 적용하여 부반송파 사용 비율 변화에 따른 다중 객체 개수 추정 성능을 분석한다.

II. OFDM 레이다 시스템 기반 다중 객체 개수 추정 구조

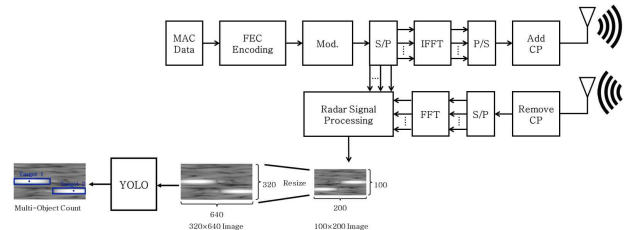


그림 1. OFDM 레이다 기반 다중 객체 개수 추정을 위한 시스템 블록도

OFDM 레이다 시스템 및 제안하는 다중 객체 개수 추정 알고리즘의 전체 구조는 그림 1과 같다. 다중 객체로부터 반사된 OFDM 수신 신호를 기반으로 생성된 2차원 주기도(2D-Periodogram)를 YOLOv8 모델의 입

력으로 사용하여, 다중 객체의 존재 여부 및 개수를 추정한다.

III. 모의실험 환경 및 결과

본 연구에서는 MATLAB을 이용하여 OFDM 레이다 시스템의 학습용 및 테스트용 데이터를 생성하였으며, 다양한 SNR 조건과 부반송파 사용 비율을 반영하여 다중 객체 환경을 시뮬레이션하였다. 이후 Tensorflow 기반의 딥러닝 프레임워크를 이용하여 YOLO 모델의 학습 및 성능 검증을 수행하였다. YOLO 모델의 배치 크기, 학습률 등 하이퍼파라미터는 사전 실험을 통해 선정하였다. 학습은 최대 100 Epoch까지 수행하였으며, 과적합을 방지하기 위해 검증 데이터의 loss 변화를 기준으로 조기 종료(Early Stopping)를 적용하였다. 성능 평가는 평균 절대 오차(Mean Absolute Error, MAE)를 주요 지표로 사용하였다. OFDM 레이다 시스템의 주요 파라미터는 표 1과 같다.

표1. 모의실험 환경

| Parameter | Value |
|----------------------|-------------------|
| OFDM Symbol Duration | 35.74 μs |
| Sampling Frequency | 128.88 MHz |
| IFFT(FFT) Size | 4096 |
| Bandwidth | 40 MHz |
| Center Frequency | 28 GHz |
| Length of CP | 296 |
| Num. of OFDM Symbol | 2,4,8 |
| 2D FFT Size | 2048 \times 256 |
| Cropped Region Size | 200 \times 100 |
| Num. of Target | 1 ~ 5 |
| SNR Range | -10 ~ 20 dB |
| Num. of Train Data | 50,000 |
| Num. of Test Data | 110,000 |

본 논문에서는 레이다 성능을 우선적으로 고려하여, 기존 통신 시스템의 자원 할당 방식과 달리 전체 대역폭 내에서 일부 부반송파만을 등간격으로 선택하는 할당 방식을 적용하였다. 해당 할당 방식에서는 동일한 시스템 파라미터 조건에서 부반송파 사용 비율이 감소함에 따라 유효 부반송파 간격이 증가하게 되며, 이로 인해 거리 축에서 해석 가능한 유효 범위가 제한되거나 거리 모호성이 증가하는 특성이 나타날 수 있다. 본 연구에서는 부반송파 사용 비율에 따른 성능 변화를 분석하기 위해 다음과 같은 세 가지 경우를 고려하였다. 첫 번째 경우는 전체 부반송파를 모두 사용하는 100% 사용, 두 번째 경우는 부반송파를 하나 건너 하나씩 사용하는 50% 사용으로, 이때 부반송파 간격은 2배로 증가한다. 세 번째 경우는 전체 부반송파 중 4개당 1개만 사용하는 25% 사용으로, 부반송파 간격이 4배로 증가하게 된다. 이러한 세 가지 조건을 통해 부반송파 사용 비율 변화가 시스템 성능에 미치는 영향을 체계적으로 평가하였다.

그림 2는 SNR 조건에 따라 OFDM 심볼 수 및 부반송파 사용 비율 변화에 따른 다중 객체 개수 추정 성능을 나타낸다. 실험 결과, 부반송파 사용 비율을 100%, 50%, 25%로 감소시킬 경우 낮은 SNR 구간에서 성능 차이가 다소 나타났으나, 전체적인 경향에서는 부반송파 사용 비율 감소에도 불구하고 비교적 안정적인 다중 객체 개수 추정 성능이 유지됨을 확인하였다. 반면, OFDM 심볼 수의 증가는 다중 객체 개수 추정 성능에 뚜렷한 영향을 미쳤으며, 특히 심볼 수가 2개에서 8개로 증가할 경우 성능이 현저히 향상되었다. 이러한 성능 개선 효과는 낮은 SNR 환경에서 더욱 뚜렷하게 나타났다.

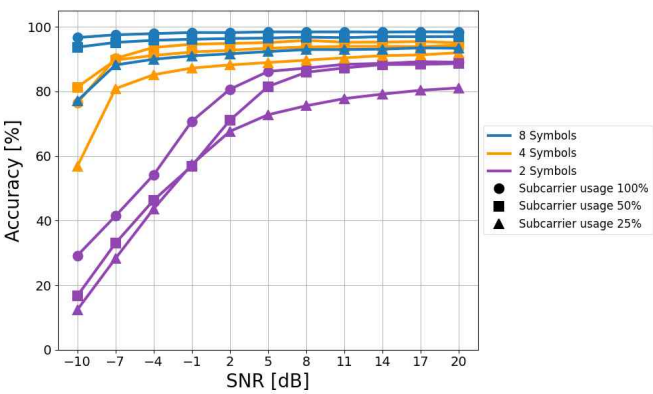


그림 2. SNR에 따른 부반송파 사용 비율에 따른 다중 객체의 개수 추정 성능

IV. 결론

본 논문에서는 OFDM 레이다 시스템에서 YOLOv8 모델을 활용하여 부반송파 사용 비율이 다중 객체 개수 추정 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 표적으로부터 반사된 OFDM 신호로부터 생성된 2차원 주기도를 YOLOv8의 입력으로 활용함으로써, 다중 객체의 존재 여부 및 개수를 효과적으로 추정할 수 있음을 확인하였다. 시뮬레이션 결과, 부반송파 사용 비율을 감소시켜 주파수 자원을 절약하더라도 다중 객체 개수 추정 성능은 본 실험 조건에서는 유의미하게 저하되지 않는 것으로 확인되었다. 반면, 부반송파 간격 증가에 따라 최대 탐지 가능 거리 및 거리 축 범위가 제한되는 물리적 한계가 존재함을 확인하였으며, 이에 따라 실제 응용 환경의 요구 탐지 거리를 고려한 부반송파 사용 비율의 선정이 필요함을 알 수 있다. 또한, OFDM 심볼 수는 다중 객체 개수 추정 성능에 중요한 영향을 미치는 핵심 요소로 작용하였으며, 특히 낮은 SNR 환경에서 심볼 수 증가에 따른 성능 향상 효과가 더욱 두드러지게 나타났다. 이러한 결과는 향후 통신-센싱 융합 시스템 설계 시 부반송파 사용 비율 조정보다 OFDM 심볼 수의 최적화가 다중 객체 개수 추정 성능에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구는 자율주행, 스마트 시티, 보안 감시 및 국방 분야 등 다양한 응용 환경에 적용할 수 있으며, 차세대 통신-센싱 융합 기술 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 다중 객체의 개수 추정뿐만 아니라 위치 및 속도 추정을 포함한 확장된 센싱 기능을 고려하고, 실제 하드웨어 기반 실험을 통해 제안 기법의 실용성을 검증할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] A. Magbool, V. Kumar, Q. Wu, M. Di Renzo and M. F. Flanagan, "A Survey on Integrated Sensing and Communication With Intelligent Metasurfaces: Trends, Challenges, and Opportunities," in IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 6, pp. 7270-7318, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3594049.

[2] E. A. Ko, S. Y. Jeon, and E. R. Jung, "Multi-object detection and range/velocity estimation in OFDM radar system using YOLOv8," in Proc. 2025 Summer Annual Conf. Korean Inst. Commun. Inf. Sci. (KICS), Jun. 2025, pp. 277 - 278.